

# Bipolar 송신 패드를 적용한 7.2 kW 급 무선 충전 시스템의 구동 알고리즘 및 보상 네트워크 설계 방안

이도현, 이주아, 심동현, 조현우, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Design of Driving Algorithm and Compensation Network for 7.2 kW Wireless Charging System with Bipolar Transmission Pad

Do Hyeon Lee, Ju-A Lee, Dong Hyeon Sim, Hyeonu Jo, Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 무선 충전 시스템의 대용량화를 위하여 멀티 코일 구성의 BPP (Bipolar Pad)를 적용한 7.2 [kW] 급 무선 충전 시스템의 구동 알고리즘을 제시한다. BPP는 두 개의 코일이 차량의 정렬 위치에 따라 결합 성능이 변화하여 효율적인 전력 전달을 위한 구동 알고리즘이 요구된다. 따라서, 코일 결합 성능에 따른 선택 구동 알고리즘을 제안한다. 또한, 알고리즘이 적용된 보상 네트워크를 설계하고 PSIM 시뮬레이션 및 실험 검증을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

최근 무선 충전 기술이 발전함에 따라 전기자동차용 무선 충전기의 상용화가 진행되고 있으며, 충전 시간 단축 및 충전 성능 향상을 위한 대용량 무선 충전 시스템에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 현재 대부분의 무선 충전 시스템은 CP (Circular pad)와 같은 단일 코일 패드를 적용하고 있어 대용량 시스템 구성 시 높은 전력으로 인하여 회로 소자 및 권선의 정격이 상승하는 문제가 발생한다. 반면 BPP (Bipolar Pad), DDQP (Double-D Quadrature Pad)와 같은 멀티 코일 패드를 적용할 경우, 다상의 코일이 전력을 분담하여 회로 소자 및 권선의 정격을 감소시킬 수 있다. 따라서, 무선 충전 시스템의 대용량화를 위하여 멀티 코일 패드의 적용이 필요하다.

멀티 코일 패드의 일종인 BPP는 그림 1과 같이 2개의 코일이 수직 자속을 생성하여 충전기 (Ground Assembly, GA)와 차량 (Vehicle Assembly, VA) 간의 수직 및 수평 이격 발생 시에도 우수한 결합 성능 특성을 가진다. CP는 단일 코일을 통해 수직 자속을 생성하는 반면, BPP는 2개의 코일을 통해 더 강한 수직 자속을 생성할 수 있어 수직 이격에 대해 CP보다 더 높은 결합 성능을 가진다. 또한, 수평 이격 발생 시 CP는 결합 성능이 급격히 감소하는 반면, BPP는 2개의 코일이 서로 편차를 두고 위치하여 결합 성능이 상호 보완되어 높은 결합 성능이 확보하므로, 수평 이격 대응에 용이하다. 하지만, 각 코일의 결합 성능 변화에 관계없이 2개의 코일을 항상 구동할 경우, 낮은 결합 성능을 가진 코일에서 전력 전달이 원활하지 않고 불필요한 동작을 수행하여 시스템의 효율 저하를 유발한다. 이와 같은 이유로 효율적인 전력 전달을 위하여 각 코일의 결합 성능 변화에 따른 구동 알고리즘이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 BPP를 송신 패드, CP를 수신 패드로

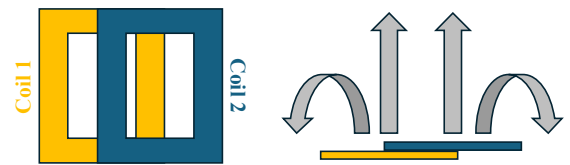


그림 1 BPP 구조 및 자속 분포

Fig. 1 Structure and magnetic flux distribution of BPP

(Inductive Power Transfer) 컨버터의 구동 알고리즘과 보상 네트워크 설계 방안을 제시한다. GA와 VA 간 정렬 오차에 따른 BPP-CP 간의 결합 계수 특성을 확인하고, 이를 통해 효율적인 전력 전달을 위하여 높은 결합 성능을 가진 코일을 선택적으로 구동하는 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘이 적용된 IPT 컨버터의 보상 네트워크를 설계하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 설계 결과를 검증한다. 또한, 실제 하드웨어를 구현하고 실험을 통해 제안하는 구동 알고리즘의 유효성을 입증한다.

### 2. BPP (GA) - CP (VA) 시스템 IPT 컨버터의 구동 알고리즘 제안

#### 2.1 송·수신 패드 정렬 오차에 따른 결합 계수 특성

본 논문에서는 BPP를 송신 패드, CP를 수신 패드로 선정하여 그림 2와 같이 제작하였으며, 그림 2 (a)는 BPP 내 Coil 1, 2를 나타내고 그림 2 (b)는 CP를 나타낸다. 제작된 송·수신 패드의 크기 및 턴 수는 표 1과 같다. 송·수신 패드의 정렬 오차 범위가 X축  $\pm 75$  [mm], Y축  $\pm 75$  [mm], Z축 100~170 [mm] 내에서 결합 계수를 측정하여 그림 3과 같이 나타내었다. 이때,  $k_1$ 은 Coil 1과 CP 사이의 결합 계수,  $k_2$ 는 Coil 2와 CP 사이의 결합 계수를 의미한다. 그림 3에서 Y축 및 Z축 이격에 상관없이 양의 방향으로 X축 이격이 증가할수록  $k_1$ 은 증가하고  $k_2$ 는 감소하는 양상을 보인다. 이는 CP가 X축의 양의 방향으로 이동함에 따라 Coil 1과 정렬되어 Coil 1과의 결합 성능이 상승하는 반면, Coil 2와 멀어져 Coil 2와의 결합 성능이 감소하기 때



(a) GA 용 BPP

(b) VA 용 CP

그림 2 WPT2 규격 송·수신 패드

Fig. 2 BPP (GA), CP (VA) of WPT2 class

표 1 송·수신 패드 파라미터

Table 1 Parameters of BPP (GA) and CP (VA)

Parameter [Unit]		Value
GA	Coil 1 dimension [mm]	427 × 590
	Coil 1 turns [turns]	14
	Coil 2 dimension [mm]	427 × 590
	Coil 2 turns [turns]	14
VA	Circular coil dimension [mm]	320 × 320
	Circular coil turns [turns]	8

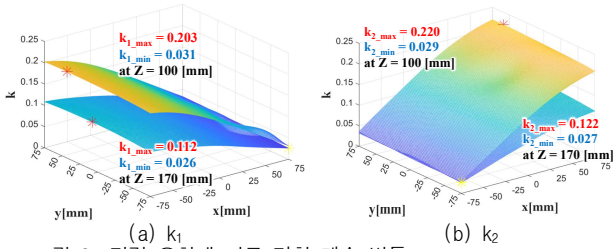


그림 3 정렬 오차에 따른 결합 계수 변동

Fig. 3 Variation of coupling coefficient according to alignment error  
문이다. 반면 음의 방향으로 X축 이격이 증가할수록 CP가 Coil 1과 멀어지고 Coil 2와 정렬되어,  $k_1$ 은 감소하고  $k_2$ 는 증가하는 양상을 보인다. 이를 통해 BPP를 구성하는 2개의 코일이 서로 상호 보완적인 결합 성능 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

## 2.2 제안하는 구동 알고리즘

본 논문에서는 BPP의 상호 보완적인 결합 특성을 고려하여 결합 계수에 따라 Coil 1과 2를 선택적으로 구동하는 알고리즘을 제안한다. 2.1절의 결과를 기반으로 동작 조건을 5가지 case로 구분할 수 있다.

먼저, VA가 X축의 양의 방향에 위치하여  $k_1$ 이 매우 작은 경우, Coil 1을 통해 전달되는 전력은 작으므로 Coil 2를 단독 구동한다. 이 동작 조건에서 동시 구동할 경우, 대부분의 전력 전달을 Coil 2가 수행하므로 멀티 코일 패드의 전력 분담 이점을 활용하지 못하며, 특히 Coil 1의 전달 전력이 2 [kW] 이하인 경우, 전달 전력 대비 송·수신 패드 간 손실이 우세하여 효율이 감소한다. 그림 4는 코일 동시 구동 시 정렬 오차에 따른  $k_1$ 과 Coil 1의 전달 전력  $P_1$ 을 나타내며,  $k_1$ 가 0.04일 때 전달하는 최대 전력이 2 [kW]이므로, 본 논문에서는 효율적인 전력 전달을 위해 Coil 1이 구동하는  $k_1$ 의 최소값을 0.04로 설정하였다. 반대로, VA가 X축의 음의 방향으로 위치하여  $k_2$ 가 0.04보다 작은 경우,  $k_1$ 과 동일한 이유로 Coil 1을 단독 구동한다.

다음으로, VA가 X축의 중앙 부근에 위치하여  $k_1$ 과  $k_2$ 가 모두 0.04보다 큰 경우,  $k_1$ 과  $k_2$ 의 차가 나타나는  $k_{diff}$ 의 값을 확인한다.  $k_1$ 과  $k_2$ 의 값이 서로 상이하여  $k_{diff}$ 가 큰 경우, Coil 1과 2의 ZPA (Zero Phase Angle) 주파수 차이가 크게 발생한다. 이때 코일을 동시 구동하는 방식을 사용하면 2개의 코일 구동 회로 간 ZPA 주파수가 서로 다르므로, 동시에 ZPA 동작 수행이

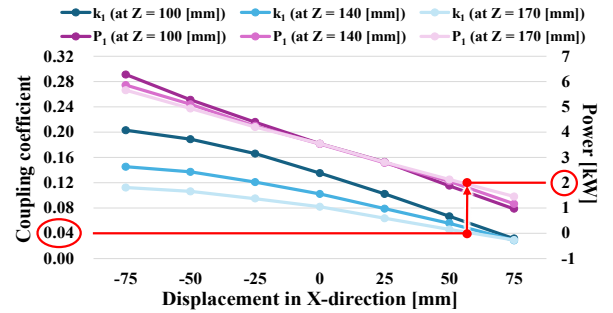


그림 4 정렬 오차에 따른 결합 계수  $k_1$  및 Coil 1의 전달 전력  $P_1$   
Fig. 4 Coupling coefficient  $k_1$  and transmitted power  $P_1$  of Coil 1 according to alignment error

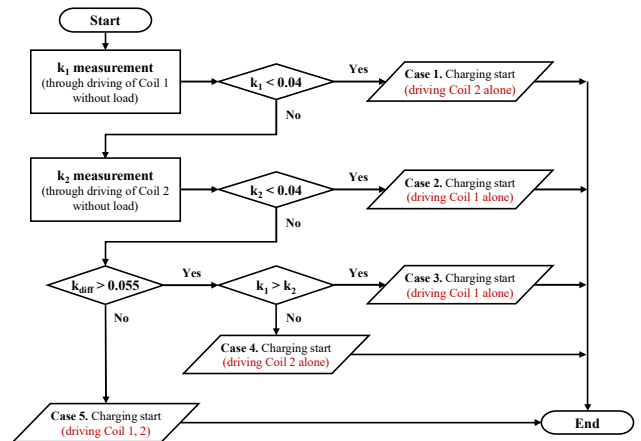


그림 5 제안하는 구동 알고리즘 순서도

Fig. 5 Flowchart of proposed driving algorithms

불가능하며 턴 오프 전류 상승으로 인해 hard switching에 의한 턴 오프 손실이 발생한다. 반면,  $k_{diff}$ 가 작은 경우, ZPA 주파수의 차이가 미미하므로 스위칭 주파수 제어를 통해 턴 오프 전류를 제한하여 턴 오프 손실을 저감할 수 있다. 이때, PSIM 시뮬레이션을 통해 주파수 제어로 턴 오프 전류 저감이 가능한  $k_{diff}$ 의 최대값이 0.055임을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서는  $k_{diff}$ 가 0.055보다 큰 경우  $k_1$ 과  $k_2$ 를 비교하여 더 높은 결합 성능의 코일을 단독 구동하여 해당 코일에서 ZPA 동작을 확보한다. 반면,  $k_{diff}$ 가 0.055보다 작은 경우, 스위칭 주파수 제어를 통해 턴 오프 전류를 4~10 [A] 정도로 제한 가능하여 턴 오프 손실이 크게 발생하지 않으므로, Coil 1과 2를 동시 구동하여 전력을 분담하는 방식을 사용한다.

그림 5는 제안하는 구동 알고리즘의 순서도를 나타내며, 그림 6은 정렬 오차에 따른 결합 계수와 구동 알고리즘 적용 시 코일 구동 방식을 나타내었다. 이를 통해 X축 방향 정렬 오차가 큰 경우 높은 결합 성능을 가진 코일이 단독 구동하며, X축 방향으로 정렬되어 결합 성능이 부족한 동작 조건에서는 동시 구동을 통해 보완됨을 확인할 수 있다.

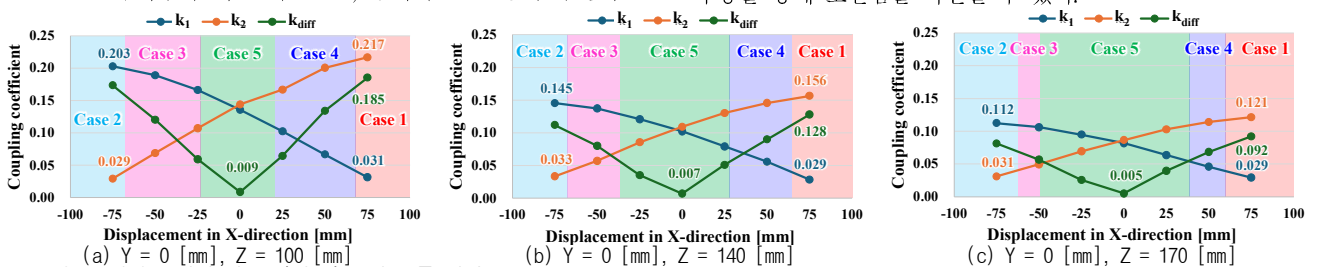


그림 6 정렬 오차에 따른 결합 계수 및 구동 방식

Fig. 6 Coupling coefficients and driving methods according to alignment error

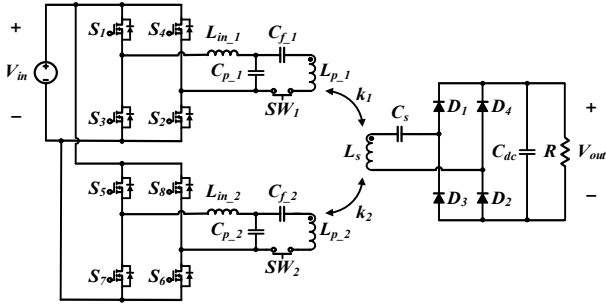


그림 7 BPP - CP 무선 충전 시스템의 IPT 컨버터 회로도  
Fig. 7 IPT converter circuit of BPP - CP wireless charging system

표 2 LCCL-S 보상 네트워크 파라미터  
Table 2 Parameters of LCC-S compensation network

Parameter [Unit]	Value				
Input voltage ( $V_{in}$ ) [V]	600				
Output voltage ( $V_{out}$ ) [V]	300 ~ 900				
Output power ( $P_{out}$ ) [kW]	7.2				
Switching frequency ( $f_{sw}$ ) [kHz]	79 ~ 90				
Coil 1	$k_{1\_min}$	$k_{1\_Vout,max}$	Coil 2	$k_{2\_min}$	$k_{2\_Vout,max}$
$k_1$	0.1027	0.1363	$k_2$	0.1056	0.1496
$L_{p,1}$ [ $\mu$ H]	314.972	318.809	$L_{p,2}$ [ $\mu$ H]	287.259	290.317
$L_s$ [ $\mu$ H]	155.524	161.340	$L_s$ [ $\mu$ H]	155.678	161.340
$L_{in,1}$ [ $\mu$ H]	42.606		$L_{in,2}$ [ $\mu$ H]	41.889	
$C_{p,1}$ [nF]	84.258		$C_{p,2}$ [nF]	85.701	
$C_{r,1}$ [nF]	13.180		$C_{r,2}$ [nF]	14.631	
$C_s$ [nF]				23.083	

### 3. BPP (GA) - CP (VA) 시스템 보상 네트워크 설계

#### 3.1 IPT 컨버터 LCCL-S 보상 네트워크 설계

본 논문에서는 정전압 출력 특성, 부하 변동과 관계없이 일정한 ZPA 주파수, 낮은 발생 가능성의 bifurcation 특성을 가지는 LCCL-S 보상 네트워크를 적용하였다<sup>[1]</sup>. 그림 7은 BPP (GA) - CP (VA) 시스템의 IPT 컨버터 회로도를 나타낸다. SW<sub>1</sub>, SW<sub>2</sub>는 각각 Coil 1, 2가 구동하지 않을 경우 off 상태를 유지하여 VA 측 전류로 인해 GA 측으로 발생하는 전류를 차단한다. VA 측 유도 전압은 각 Coil 1, 2에 의해서 유도되는 전압의 합으로 나타나고, 이때의 유도 전압이 적정 범위 내로 들어오도록 보상 네트워크 설계를 진행한다.

먼저, 각 코일의 단독 구동 시 최소 결합 계수  $k_{1\_min}$ ,  $k_{2\_min}$ 을 기준으로 Coil 1과 2의 보상 네트워크를 진행한다. 이때 1200 [V] 정격의 전력 반도체 소자 적용을 위해 safety margin을 고려하여 IPT 컨버터 최대 출력 전압은 900 [V]가 되도록 설계하였다. 이격 조건이 (0, 75, 100)인 조건에서의 결합 계수  $k_{1\_Vout,max}$ ,  $k_{2\_Vout,max}$ 에서 최대 전압이 출력되며, 이를 고려하여 최소 결합 계수 조건에서 출력 전압이 320 [V]가 되도록 보상 네트워크를 설계한다. 표 2는 각 보상 네트워크의 설계 조건과 설계 결과를 나타낸다.

#### 3.2 보상 네트워크 설계 결과 검증

본 절에서는 IPT 컨버터의 보상 네트워크 설계 결과를 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다. 구동 알고리즘 조건에 따른 시뮬레이션 조건은 표 3과 같으며 시뮬레이션 결과 파형은 그림 8과 같다. 이를 통해 제안하는 구동 알고리즘이 적용된 IPT 컨버터가 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다. 이때 높은 턴 오프 전류로 인한 과도한 스위칭 손실을 방지하기

표 3 IPT 컨버터 시뮬레이션 조건

Table 3 Simulation conditions for IPT converter

Case	Driving VA position [mm] (X, Y, Z)	$k_1$	$k_2$	$V_{out}$ [V]
1	(75, -75, 170)	0.0260	0.1122	315
2	(75, -75, 170)	0.1047	0.0267	300
3	(75, -75, 170)	0.1888	0.0687	590
4	(75, -75, 170)	0.0665	0.2004	613
5	1, 2 (75, -75, 170)	0.1363	0.1496	895
	1, 2 (75, -75, 170)	0.1021	0.1092	652

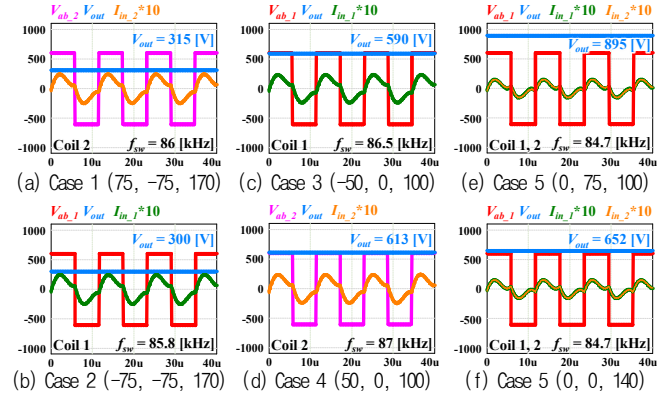


그림 8 구동 조건에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Simulation results according to driving conditions

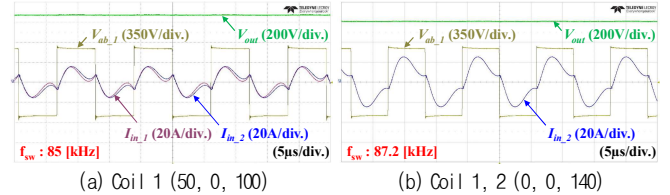


그림 9 구동 코일에 따른 실험 파형

Fig. 9 Experimental waveforms according to driving coils

위하여 스위칭 주파수 제어를 통해 턴 오프 전류를 4~10 [A] 이내로 제한하였다. 그림 9는 구동 코일에 따른 IPT 컨버터 실험 파형을 나타낸다. 실험 조건은 그림 8 (d), (f)에서의 시뮬레이션 조건과 같으며, 해당 시뮬레이션 파형과 실험 파형을 통해 실제 하드웨어에서 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 BPP - CP 무선 충전 시스템에서의 송수신 패드 간 정렬 오차에 따른 결합 계수 변화 양상을 분석하고, 이를 기반으로 IPT 컨버터의 구동 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘이 적용된 IPT 컨버터의 보상 네트워크 설계를 진행하고 이를 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 Case 1~5 조건에서 모두 정상 동작함을 검증하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0025182)

### 참고 문헌

[1] M. K. Kim, D. M. Joo, D. G. Woo and B. K. Lee, "Counterplan of Output Voltage Variation in accordance with Coupling Coefficient Increase for LCCL-S Compensation Network IPT Systems," *Power Electron. Conf.*, Nov. 2015.